

基于磁路的高温超导带材临界电流连续检测方法

邹圣楠, 顾 晨, 瞿体明, 韩征和

(清华大学 先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要:介绍了一种基于磁路的连续检测高温超导带材临界电流的方法, 这种方法具有 2 个突出优势: (1) 从原理上不会受机械振动影响产生噪音, 从而可以实现高速、稳定的测量; (2) 可以测量带有铁磁性 RABiTS 基底的高温超导带材。本研究介绍了该方法的基本原理, 并搭建了用于测量千米级高温超导带材的实验装置。并通过对铋系、钇系高温超导带材的检测, 验证了本方法的优势。

关键词: 高温超导带材; 临界电流; 连续测量; 磁路

中图分类号: TM26

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)02-0429-04

以铋系(Bi2223/Ag)和钇系(YBCO)为代表的高温超导带材已逐步实现产业化生产。相对于常规导体, 高温超导带材具有直流无电阻的特性, 其载流能力是同等截面常规导体的几十倍, 因此高温超导电力器件具有能量损耗低, 功率密度高的优势^[1]。然而, 由于高温超导材料属于陶瓷材料, 在生产及使用中容易产生局部缺陷^[2], 造成局部临界电流降低, 这些局部缺陷有可能成为集中发热点, 造成整个电力器件崩溃^[3]。因此, 对高温超导长带进行临界电流的连续检测是十分必要的。霍尔探头法^[4,5]是目前非接触式长带临界电流连续检测的主要方法。该方法利用霍尔探头测量超导带材处于磁场中或经励磁后附近的磁场的分布, 进而反算出带材的临界电流。该方法对霍尔探头的位置十分敏感, 样品走带中不可避免的机械振动会引起较大的测量噪声。另外, 霍尔探头法并不能用于测量带有铁磁性 RABiTS 基底^[6]的高温超导带材, 因为铁磁性基底扭曲了带材周围的磁场分布。

本研究介绍一种基于磁路的连续测量高温超导带材临界电流的方法, 称为磁路法。这种方法相对于霍尔探头法等其它现有方法具备 2 个突出优势: (1) 从原理上不会受机械振动影响产生噪音, 从而可以实现高速、稳定的测量; (2) 可以测量带有铁磁性 RABiTS 基底的高温超导带材。本研究将介绍磁路法的原理, 并搭建用于千米级高温超导带材的临界电流检测装置, 通过对多种类型超导带材的检测验证本方法的优势。

1 测量方法与原理

磁路法使用了 2 个磁路, 分别为激励磁路(exciting magnetic circuit, EMC)和探测磁路(detecting magnetic circuit, DMC), 如图 1 所示。激励磁路在激励线圈作用下, 在激励狭缝中产生 1 个大于待测样品 2 倍穿透场的直流磁场。测量磁路中存在 2 个气隙, 其中 1 个放有低温霍尔探头。测量时, 2 个磁路均浸泡于液氮中, 带材经冷却后进入超导态, 首先通过激励狭缝, 在其中受磁场激励后带有跑道型的剩余电流^[7](从截面看, 带材从中线分开分别带有大小相等方向相反的电流 $I_0/2$, I_0 为临界态模型^[8]下带材的临界电流)。然后带材通过测量磁路的样品狭缝, 带材上的剩余电流激励测量磁路产生磁通, 此时位于探测狭缝中的霍尔探头测量出测量磁路中的磁感应强度 B_m 。从安培定律出发, 可以推导出^[9,10]:

$$B_m = \frac{aI_0}{4w(L_m/\mu_m + L_a/\mu_0)} \quad (1)$$

其中, a 为超导带材的宽度, w 为磁路宽度, L_m 和 L_a 分别为等效平均磁路路径在磁芯内和在气隙中的长度, μ_m 和 μ_0 分别为磁芯和空气的磁导率。

从公式(1)中可以看出, B_m 与 I_0 成正比, 且比例系数仅与带材的宽度、磁路的几何尺寸及其材料性质有关, 与带材在样品狭缝中的具体位置无关, 这说明测量结果不受带材的振动位移影响, 即从原理上避免了机械振动引起的测量噪音。另一方面, 由于磁路法不依赖于带材周围具体的磁场分布, 对于有铁磁性基底的带材, B_m 与 I_0 的正比关系仍然成立, 铁磁性基底可以被当做磁路的少量延伸(约 100 μm), 仅使得公

收稿日期: 2014-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(50907035); 国家国际科技合作项目(2010DFA64510)

作者简介: 邹圣楠, 女, 1988 年生, 硕士生, 清华大学物理系应用超导研究中心, 北京 100084, 电话: 010-62789339-210, E-mail: zsn11@mails.tsinghua.edu.cn

式(1)中的比例系数有微小改变, 因此磁路法可以用于测量带有铁磁性基底的高温超导带材。

2 实验装置

基于如上测量方法, 设计并搭建了一套可连续测量千米级高温超导带材临界电流的实验装置, 其实物照片如图 2 所示。

激励磁路由紧密排绕铜线的 C 形软铁芯制成, 激励狭缝中可产生 0.22 T 的磁场 (大于 4 mm 宽、临界电流约 200 A 的 Bi2223/Ag 或 YBCO 带材的 2 倍穿透场)。测量磁路由 2 块半环形的坡莫合金叠片制成, 使用坡莫合金的目的是尽可能减小剩磁; 使用的霍尔探头为适用于液氮温度的高线性低温霍尔探头。激励磁路与探测磁路均被封装于由铝和玻璃钢板制成的盒子中。测量时 2 个磁路沿提拉轨道下降并浸泡在液氮中。浸泡部分与提拉轨道的接触部分由环氧树脂板制成, 目的是尽可能减少热传导。

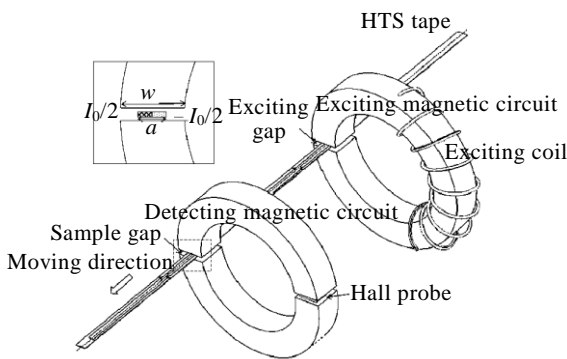


图 1 磁路法测量结构与原理示意图

Fig.1 Structure and principle sketches of the magnetic-circuit method

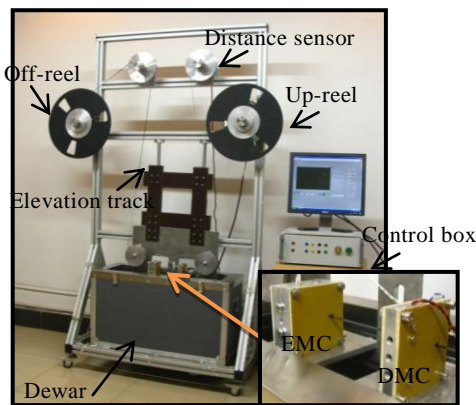


图 2 磁路法测量装置

Fig.2 Apparatus using a magnetic-circuit method

测量时, 样品线盘放置于放线轮上, 收线轮在电机带动下转动收线, 样品通过导引轮依次通过激励磁路和探测磁路。样品与其中一个导引轮进行无滑动接触, 导引轮上带有传感器, 可以记录该轮的转动角度, 从而获得带材的传动距离的信息。2 个磁路、电机及距离传感器的供电和控制装置均放置于机箱中, 通过计算机控制电机传动样品的速度和方向, 并采集和处理磁场、传动距离信号。

3 实验结果

为了验证本方法的两个优势, 本研究中设计了 3 组实验, 其中第 1 组的重复性测量可以考察测量结果的稳定性, 第 2 组和第 3 组分别对贴覆铁磁性金属带的铋系带材和具有 RABiTS 基底的钕系带材进行测量。

3.1 重复性测试

为了验证本方法对机械振动噪声的抵抗性, 一根 100 m 长 Bi2223/Ag 带材 (北京英纳超导公司生产) 被重复测量了 3 次, 测量时带材传动速度均为 5 cm/s。在带材尾端, 沿长度方向每隔 0.5 m 剥落约 0.5 cm 的

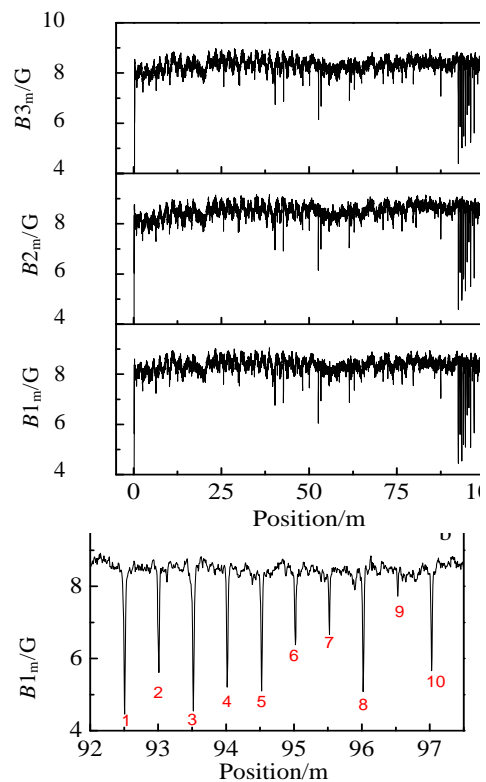


图 3 100 m Bi2223/Ag 带材重复测量 3 次及 B_{1m}局部放大

Fig.3 Repetitive examinations of a 100 m long Bi2223/Ag tape for three times (a) and zooming-in of B_{1m} (b)

超导芯作为人为制造的坏点。由于 Bi2223/Ag 带材截面内的超导芯形状不规则，不易从理论上确定 B_m 和 I_0 的比例系数。以往研究表明，四点法测量结果与磁路法波动一致，可以使用四点法测量部分短样品来标定 Bi2223/Ag 带材 B_m 和 I_0 的比例系数^[10]。考虑到 B_m 和 I_0 成正比， B_m 本身即可代表带材的临界电流， B_m 未被换算成 I_0 。测量结果如图 3 所示。

由图 3a 可以看到，3 次测量结果的波动行为显示很好的一致性，每 2 次测量结果之间的相对差异均低于测量平均值的 2%。由图 3b 可以明显看到人为制造的 10 个坏点的信号，其磁信号下降量普遍大于 2 G，半高宽均小于 2.5 cm。

上述的重复测量中，结果具有很好的一致性，在高速测量中不可避免的机械震动没有导致明显的影响，并且能够反映人造缺陷的位置，这表明磁路法可高速、稳定地检测高温超导带材的临界电流均匀性。

3.2 有铁磁性基底与无铁磁性基底测量结果对比

为了验证磁路法对有铁磁性基底带材的测量能力，对比了同一根超导带材分别在“有铁磁性基底”和“无铁磁性基底”情况下的测量结果。具体方法是，对一根 Bi2223/Ag 带材进行测量，然后在其上贴覆一层同样宽度、厚度 100 μm 的坡莫合金带后再次进行测量。该测量结果也使用了 B_m 来表示电流性能，如图 4 所示。

由图 4 可以看到，贴覆坡莫合金带前后测量结果的整体波动一致，充分证明了铁磁性基底并未影响临界电流均匀性的检测。而贴覆坡莫合金带前后，少数位置的测量值产生了少量差异。这可能由 2 个原因造成，一是坡莫合金经过激励磁路的励磁后产生的不均匀剩磁，叠加进了样品的磁场信号；二是坡莫合金与

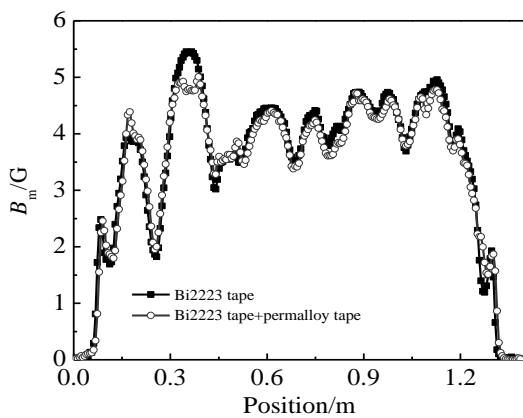


图4 对一根 Bi2223/Ag 带材贴覆坡莫合金前后的测量结果
Fig.4 Comparative examinations of a Bi2223/Ag tape with and without permalloy tape attachment

超导带材的相互作用改变了带材内的电流分布，使得电流分布偏离了图 1 中理想的跑道型分布^[10]。

3.3 对 RABiTS 基底的 YBCO 工业长带检测

考虑到目前应用于工业生产的 RABiTS 基底一般经过轧制和退火，其厚度和磁性能较为均匀，因而对超导带材各处的影响较为一致，铁磁性基底对测量的干扰可以忽略。通过对一根美国超导公司生产的 200 m 长 RABiTS 基底的高温超导带材进行了检测，验证了磁路法对有铁磁性基底带材的实测能力。

测量速度 3 cm/s，结果如图 5 所示。由于钇系带材的横截面非常规则，利用其几何参数结合测量按照图 1 分布电流的铜带可以标定出 B_m 和 I_0 值的转换系数^[10]，图 5 中的测量结果使用了电流值作为纵坐标。磁路法测得的电流值在 77 A 左右，而使用四点法测得的临界电流值约为 95 A。这个差异是由于磁路法测量的电流是衰减后稳定维持的电流，而四点法测量的临界电流值是样品处于磁通蠕动阶段的电流值^[11]，二者的波动是一致的。

由图 5 可以看出，该样品的电流测量结果曲线较为平滑，反映出较好的临界电流均匀性。值得注意的是，在 50 m 处存在一个奇异的尖峰，等效的电流值高达 140 A；并且以其为分界，前段的带材有若干 10 A 电流下降的波动，而后段带材基本是完全均匀的。观察 50 m 处的带材后发现，该点为 1 个焊接点，因此厚度为正常样品的 2 倍，包含双层超导层。这很好地解释了该点的临界电流测量值约为其它位置的 2 倍这一现象。制造商可能是通过将 2 根带材焊接在一起的方式来实现生产长带材的目的。对此样品的测量充分反映了磁路法对铁磁性基底带材临界电流均匀性的检测能力。

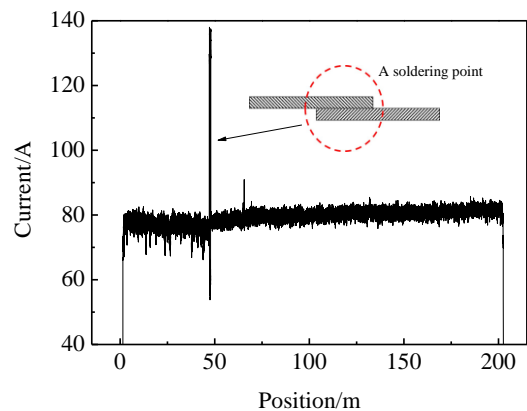


图5 对 200 m RABiTS 基底带材的测量结果
Fig.5 Critical current examination of a 200 m long YBCO tape with RABiTS substrate

4 结 论

1) 给出了磁路法的测量原理, 并搭建了用于测量千米级高温超导带材的测量装置。一根 100 m 长的 Bi2223/Ag 高温超导带材被重复测量了 3 次, 结果反映出很好的重复性(>98%), 并且人为制造的缺陷点均被显著定位。

2) 一根 Bi2223/Ag 带材被测量后贴覆了一层坡莫合金带被再次测量, 贴覆前后的测量结果基本相同, 这表明铁磁性基底的存在并未影响磁路法的测量。

3) 在此基础上, 一根 200 m 长 RABiTS 工艺生产的 YBCO 带材被检测, 结果很好反映了带材均匀性, 并精确定位其中的一个焊接点。

参考文献 References

- [1] Xu Yuanyuan(许媛媛), Ma Guangtong(马光同), Deng Zigang(邓自刚) *et al. Chinese Journal of Low Temperature Physics* (低温物理学报) [J], 2013, 35(1): 43
- [2] Lu Yongjin(卢永进), Zeng Pan(曾攀). *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程) [J], 2013, 42(3): 536
- [3] Paasi J, Lehtonen J, Kalliohaka T *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2000, 13(7): 949
- [4] Wang Yinshun(王银顺), Guan Xiaojin(管潇津), Zhang Huiyuan(张慧媛) *et al. Science in China* (中国科学) [J], 2010, 40(11): 2239
- [5] Furtner S, Nemetschek R, Semerad R *et al. Supercond Sci Technol*[J], 2004, 17(5): S281
- [6] Qiu Huoqin(邱火勤), Suo Hongli(索红莉), Ma Lin(马麟) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程) [J], 2013, 42(1): 180
- [7] Brandt E H. *Phys Rev B*[J], 1996, 54(6): 4246
- [8] Bean C P. *Phys Rev Lett*[J], 1962, 8(6): 250
- [9] Gu C, Qu T M, Zou S N *et al. Rev Sci Instrum*[J], 2010, 81(8): 085105
- [10] Gu C, Qu T M, Zou S N *et al. IEEE Trans Appl Supercond*[J], 2011, 21(3): 3413
- [11] Grimaldi G, Bauer M, Kinder H. *Appl Phys Lett* [J], 2001, 79(26): 439

A Method for Continuous Measurement of Critical Current of HTS Tapes Using Magnetic Circuits

Zou Shengnan, Gu Chen, Qu Timing, Han Zhenghe

(Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper introduces a method to measure critical current of high-temperature superconductor (HTS) tapes continuously using magnetic circuits. This method has two featured advantages. First, it is resistant to noises caused by mechanical vibration in principle, so high speed stable measurements are achieved; second, it can measure HTS tapes with magnetic substrates (e.g. RABiTS). In this paper, the principle of the method is introduced and the apparatus for kilometer-length HTS tapes measurements is constructed. Several Bi2223/Ag and YBCO tapes are measured to verify advantages of the method.

Key words: HTS tape; critical current; continuous measurement; magnetic circuit

Corresponding author: Qu Timing, Associate Professor, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China, Tel: 0086-10-62789339, E-mail: tmqu@mail.tsinghua.edu.cn